

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ
ТВЕРДОГО РАСТВОРА KCl—KBr**

А. В. ШАРКО, А. А. БОТАКИ

(Рекомендована к печати кафедрой общей физики ТПИ)

На монокристаллах твердого раствора KCl—KBr разных концентраций импульсным ультразвуковым методом в интервале температур 80—300 К измерены константы упругости. Установлены закономерности их изменения на исследованном интервале температур.

Слегел и Мак-Кинстри [1] экспериментально определили зависимость констант упругости твердого раствора KCl—KBr для температур выше комнатной. Для изучения физических свойств твердых растворов не меньший интерес представляет изменение этих характеристик в области отрицательных температур.

В настоящей работе импульсным ультразвуковым методом [2—7] на частоте 2,5 МГц в интервале 80—300 К произведены измерения температурных изменений упругих свойств монокристаллов твердых растворов KCl—KBr разных концентраций. Постоянные упругости C_{ik} и коэффициенты упругости S_{ik} определялись по измеренным значениям скоростей распространения продольных упругих волн в направлениях $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ и поперечных волн в направлении $\langle 100 \rangle$. Образцы для измерений имели размеры в направлении прозвучивания от 20 до 50 мм. Особое внимание уделялось качеству подготовки поверхностей и параллельности рабочих граней образцов. Предназначенные для измерений постоянных упругости C_{11} и C_{44} образцы были изготовлены таким образом, чтобы поверхности ввода и отражения ультразвуковых колебаний совпадали с кристаллографическими плоскостями $\{100\}$, а для определения постоянной C_{12} требовались дополнительные измерения на образцах, рабочие грани которых совпадали с кристаллографическими плоскостями $\{110\}$. Измерение скоростей распространения ультразвука в монокристаллах твердого раствора KCl—KBr разных концентраций производились с помощью импульсного ультразвукового дефектоскопа ДУК-6В с датчиками совмещенного типа по методике, описанной ранее [4—7]. При снятии температурных зависимостей скоростей распространения ультразвука образец приклеивался к датчику смесью, состоящей из 88% эпоксидной смолы ЭД-5 и 12% полиэтиленполиамина и помещался в криостат. В целях предотвращения растрескивания образца в процессе измерений скорость охлаждения выдерживалась не более чем 10 К в 1 ч. Необходимая для определения упругих констант плотность образцов рассчитывалась по измеренным значениям плотности при комнатной температуре и температурному коэффициенту линейного расширения [8]. Концентрация твердого раствора измерялась по

методу потенциометрического титрования на пробах, взятых из разных частей образца. За концентрацию твердого раствора данного состава принималось среднее значение по трем измерениям. Результаты измерений коэффициентов S_{ik} и постоянных упругости C_{ik} , а также вычисленные по ним значения фактора анизотропии $A = \frac{2 C_{44}}{C_{11} - C_{12}}$ и коэффициента $B = \frac{C_{44}}{C_{12}}$, характеризующего отклонение от соотношения Коши для разных концентраций твердого раствора KCl—KBr и для его чис-

Таблица 1
100% KCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см ²			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см ² /дн			A	B
	C ₁₁	C ₁₂	C ₄₄	S ₁₁	-S ₁₂	S ₄₄		
300	3,989	0,725	0,625	0,2597	0,0452	1,600	0,383	0,862
290	4,028	0,724	0,627	0,2581	0,0443	1,595	0,379	0,866
280	4,060	0,724	0,629	0,2564	0,0433	1,590	0,377	0,869
270	4,095	0,723	0,630	0,2532	0,0426	1,587	0,374	0,871
260	4,130	0,723	0,632	0,2516	0,0418	1,582	0,371	0,874
250	4,155	0,722	0,633	0,2500	0,0412	1,580	0,369	0,877
240	4,195	0,722	0,633	0,2488	0,0404	1,580	0,367	0,878
230	4,230	0,721	0,635	0,2469	0,0395	1,575	0,362	0,881
220	4,268	0,720	0,635	0,2445	0,0390	1,575	0,358	0,882
210	4,300	0,719	0,636	0,2421	0,0380	1,572	0,355	0,885
200	4,330	0,717	0,637	0,2404	0,0373	1,570	0,353	0,889
190	4,360	0,715	0,638	0,2387	0,0365	1,567	0,351	0,892
180	4,390	0,712	0,640	0,2367	0,0355	1,562	0,350	0,899
170	4,415	0,710	0,641	0,2353	0,0350	1,560	0,346	0,902
160	4,450	0,705	0,642	0,2333	0,0340	1,558	0,343	0,910
150	4,490	0,704	0,643	0,2315	0,0335	1,555	0,340	0,913
140	4,520	0,700	0,644	0,2299	0,0330	1,553	0,337	0,920
130	4,542	0,692	0,645	0,2282	0,0320	1,550	0,334	0,930
120	4,575	0,690	0,647	0,2273	0,0310	1,546	0,333	0,937
110	4,600	0,685	0,648	0,2252	0,0305	1,543	0,331	0,946
100	4,640	0,680	0,648	0,2237	0,0295	1,543	0,327	0,953
90	4,670	0,675	0,649	0,2222	0,0290	1,541	0,325	0,961
80	4,700	0,670	0,650	0,2196	0,0280	1,538	0,323	0,969

тых компонентов KCl и KBr, помещены в табл. I—VI. Концентрация твердых растворов выражена в молярных процентах.

Для оценки точности измерений линейные температурные зависимости C_{11} , C_{44} и $\frac{C_{11} - C_{12}}{2}$ были обработаны по методу наименьших квадратов; были получены следующие максимальные значения коэффициен-

тов вариации: 1,15% для C_{11} , 1,78% для C_{44} и 2,1% для $\frac{C_{11}-C_{12}}{2}$.

Сравнение результатов наших измерений с данными Слегела и Мак-Кинстри для комнатных температур дает хорошее совпадение.

Таблица 2
74% KCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см ²			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см ² /дн			A	B
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	S_{11}	$-S_{12}$	S_{44}		
300	3,782	0,674	0,585	0,2795	0,0423	1,709	0,376	0,868
290	3,819	0,673	0,586	0,2765	0,0414	1,706	0,373	0,871
280	3,856	0,672	0,587	0,2734	0,0406	1,704	0,369	0,873
270	3,888	0,670	0,588	0,2709	0,0399	1,701	0,365	0,878
260	3,917	0,669	0,589	0,2687	0,0392	1,698	0,363	0,880
250	3,948	0,668	0,591	0,2658	0,0385	1,692	0,360	0,885
240	3,984	0,666	0,592	0,2636	0,0378	1,689	0,357	0,889
230	4,017	0,665	0,593	0,2612	0,0371	1,686	0,354	0,892
220	4,029	0,663	0,595	0,2608	0,0366	1,681	0,353	0,897
210	4,082	0,662	0,596	0,2566	0,0358	1,678	0,349	0,901
200	4,109	0,659	0,597	0,2551	0,0353	1,675	0,346	0,906
190	4,140	0,658	0,598	0,2525	0,0346	1,672	0,343	0,909
180	4,171	0,655	0,600	0,2505	0,0340	1,667	0,341	0,914
170	4,198	0,652	0,601	0,2486	0,0334	1,664	0,339	0,922
160	4,222	0,648	0,602	0,2457	0,0328	1,661	0,336	0,929
150	4,262	0,646	0,604	0,2445	0,0322	1,656	0,334	0,935
140	4,292	0,644	0,605	0,2425	0,0315	1,653	0,332	0,940
130	4,323	0,641	0,606	0,2405	0,0308	1,650	0,329	0,945
120	4,340	0,638	0,607	0,2387	0,0303	1,647	0,327	0,951
110	4,380	0,634	0,609	0,2370	0,0297	1,642	0,325	0,960
100	4,409	0,631	0,610	0,2357	0,0291	1,639	0,323	0,967
90	4,434	0,628	0,611	0,2337	0,0284	1,637	0,320	0,973
80	4,472	0,624	0,613	0,2315	0,0278	1,631	0,318	0,983

Анализируя данные измерений, можно сделать следующие выводы:

1. Постоянные упругости C_{11} и C_{44} твердых растворов KCl—KBr на исследованном интервале температур линейно возрастают с понижением температуры.

2. Зависимость постоянных упругости C_{ik} от состава имеет отрицательную неаддитивность.

3. Фактор анизотропии A с повышением температуры растет, а коэффициент $B = \frac{C_{44}}{C_{12}}$ убывает. Полной изотропии упругих свойств ($A =$

$= 1$) на исследованном интервале температур ни один из составов твердого раствора не достигает. Коэффициент B, напротив, при низких температурах интервала 80—300 К принимает значение, равное единице, для составов, содержащих более 40 мол. % KBr.

Таблица 3
51% КСІ

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11} \text{ дн/см}^2$			Коэффициенты упругости $\times 10^{11} \text{ см}^2/\text{дн}$			A	B
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	S_{11}	$-S_{12}$	S_{44}		
300	3,665	0,625	0,558	0,2871	0,0418	1,792	0,367	0,893
290	3,688	0,623	0,559	0,2850	0,0412	1,789	0,365	0,897
280	3,714	0,621	0,560	0,2827	0,0405	1,786	0,362	0,902
270	3,744	0,618	0,561	0,2808	0,0398	1,783	0,359	0,908
260	3,773	0,616	0,562	0,2782	0,0390	1,779	0,356	0,912
250	3,800	0,614	0,563	0,2756	0,0383	1,776	0,352	0,917
240	3,831	0,612	0,564	0,2729	0,0376	1,773	0,350	0,921
230	3,860	0,609	0,566	0,2705	0,0369	1,767	0,348	0,929
220	3,887	0,607	0,567	0,2686	0,0363	1,764	0,346	0,934
210	3,915	0,604	0,568	0,2663	0,0356	1,761	0,343	0,940
200	3,942	0,600	0,570	0,2643	0,0349	1,754	0,341	0,945
190	3,969	0,598	0,571	0,2622	0,0343	1,751	0,339	0,951
180	4,000	0,595	0,572	0,2599	0,0337	1,748	0,336	0,956
170	4,025	0,592	0,573	0,2581	0,0331	1,745	0,334	0,963
160	4,051	0,587	0,574	0,2562	0,0324	1,742	0,331	0,970
150	4,078	0,583	0,575	0,2543	0,0318	1,739	0,329	0,980
140	4,106	0,579	0,576	0,2527	0,0312	1,736	0,326	0,991
130	4,134	0,574	0,578	0,2504	0,0305	1,730	0,325	1,002
120	1,160	0,570	0,580	0,2486	0,0300	1,724	0,323	1,012
110	4,188	0,566	0,582	0,2467	0,0294	1,718	0,321	1,023
100	4,212	0,560	0,583	0,2451	0,0289	1,715	0,319	1,033
90	4,241	0,554	0,585	0,2430	0,0283	1,709	0,317	1,041
80	4,268	0,550	0,586	0,2413	0,0278	1,706	0,315	1,055

Таблица 4
39,5% KCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см ²			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см ² /дн			A	B
	C ₁₁	C ₁₂	C ₄₄	S ₁₁	-S ₁₂	S ₄₄		
300	3,630	0,606	0,544	0,2892	0,0414	1,838	0,360	0,897
290	3,669	0,604	0,545	0,2866	0,0407	1,835	0,356	0,902
280	3,691	0,603	0,546	0,2840	0,0400	1,832	0,354	0,905
270	3,714	0,601	0,547	0,2819	0,0393	1,828	0,351	0,910
260	3,744	0,598	0,548	0,2795	0,0386	1,825	0,348	0,916
250	3,777	0,596	0,549	0,2769	0,0380	1,821	0,345	0,921
240	3,811	0,594	0,550	0,2749	0,0373	1,818	0,342	0,926
230	3,829	0,592	0,551	0,2725	0,0366	1,815	0,340	0,931
220	3,846	0,590	0,552	0,2711	0,0359	1,812	0,339	0,936
210	3,883	0,587	0,553	0,2683	0,0354	1,808	0,336	0,942
200	3,908	0,585	0,554	0,2662	0,0347	1,805	0,333	0,947
190	3,945	0,582	0,555	0,2636	0,0341	1,803	0,330	0,953
180	3,960	0,580	0,556	0,2623	0,0335	1,799	0,329	0,958
170	3,986	0,577	0,557	0,2604	0,0329	1,795	0,327	0,965
160	4,020	0,573	0,558	0,2581	0,0324	1,789	0,324	0,973
150	4,042	0,570	0,560	0,2564	0,0317	1,786	0,323	0,982
140	4,071	0,566	0,562	0,2544	0,0311	1,779	0,321	0,993
130	4,093	0,560	0,563	0,2527	0,0304	1,776	0,319	1,005
120	4,114	0,556	0,564	0,2511	0,0299	1,773	0,317	1,015
110	4,133	0,552	0,566	0,2497	0,0293	1,767	0,316	1,026
100	4,159	0,547	0,567	0,2476	0,0288	1,764	0,314	1,036
90	4,193	0,543	0,568	0,2458	0,0282	1,761	0,311	1,046
80	4,217	0,538	0,570	0,2441	0,0276	1,754	0,310	1,060

Таблица 5
24,5% KCl

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11} \text{ дн/см}^2$			Коэффициенты упругости $\times 10^{11} \text{ см}^2/\text{дн}$			A	B
	C_{11}	C_{12}	C_{44}	S_{11}	$-S_{12}$	S_{44}		
300	3,546	0,564	0,528	0,2949	0,0405	1,894	0,354	0,936
290	3,575	0,563	0,529	0,2932	0,0398	1,890	0,351	0,939
280	3,603	0,561	0,530	0,2897	0,0390	1,887	0,348	0,947
270	3,629	0,559	0,531	0,2872	0,0383	1,883	0,346	0,950
260	3,655	0,557	0,532	0,2851	0,0377	1,880	0,343	0,951
250	3,679	0,555	0,533	0,2836	0,0372	1,876	0,341	0,960
240	3,709	0,553	0,534	0,2804	0,0364	1,873	0,339	0,965
230	3,733	0,551	0,535	0,2785	0,0358	1,869	0,336	0,971
220	3,754	0,548	0,536	0,2767	0,0352	1,866	0,334	0,978
210	3,784	0,546	0,537	0,2742	0,0346	1,862	0,332	0,984
200	3,811	0,543	0,539	0,2721	0,0339	1,855	0,330	0,993
190	3,838	0,540	0,540	0,2699	0,0333	1,852	0,327	1,000
180	3,865	0,537	0,541	0,2678	0,0327	1,848	0,325	1,007
170	3,891	0,535	0,542	0,2664	0,0322	1,845	0,323	1,013
160	3,916	0,532	0,543	0,2639	0,0316	1,842	0,321	1,021
150	3,936	0,528	0,544	0,2624	0,0310	1,838	0,319	1,031
140	3,961	0,525	0,545	0,2605	0,0305	1,835	0,317	1,038
130	3,982	0,522	0,547	0,2582	0,0299	1,828	0,315	1,048
120	4,016	0,520	0,548	0,2566	0,0294	1,825	0,313	1,054
110	4,041	0,517	0,549	0,2549	0,0289	1,821	0,311	1,062
100	4,061	0,513	0,550	0,2527	0,0283	1,818	0,309	1,072
90	4,093	0,511	0,551	0,2513	0,0279	1,815	0,307	1,078
80	4,115	0,507	0,552	0,2497	0,0274	1,812	0,300	1,088

Таблица 6
100% KBr

T°K	Постоянные упругости $\times 10^{-11}$ дн/см ²			Коэффициенты упругости $\times 10^{11}$ см ² /дн			A	B
	C ₁₁	C ₁₂	C ₄₄	S ₁₁	-S ₁₂	S ₄₄		
300	3,468	0,522	0,507	0,3002	0,0393	1,972	0,344	0,971
290	3,487	0,520	0,508	0,2983	0,0387	1,969	0,342	0,977
280	3,522	0,518	0,509	0,2951	0,0378	1,965	0,339	0,983
270	3,550	0,516	0,511	0,2925	0,0371	1,957	0,337	0,990
260	3,571	0,513	0,512	0,2905	0,0365	1,953	0,335	1,000
250	3,600	0,512	0,513	0,2877	0,0359	1,949	0,332	1,002
240	3,618	0,509	0,514	0,2855	0,0353	1,946	0,331	1,010
230	3,650	0,507	0,515	0,2836	0,0346	1,942	0,328	1,016
220	3,668	0,505	0,516	0,2820	0,0341	1,938	0,326	1,020
210	3,710	0,503	0,517	0,2786	0,0332	1,934	0,322	1,028
200	3,731	0,501	0,518	0,2769	0,0227	1,931	0,321	1,034
190	3,762	0,500	0,519	0,2743	0,0322	1,927	0,318	1,038
180	3,779	0,497	0,519	0,2729	0,0318	1,927	0,316	1,044
170	3,800	0,495	0,520	0,2713	0,0313	1,923	0,315	1,050
160	3,830	0,493	0,521	0,2690	0,0307	1,919	0,312	1,056
150	3,856	0,491	0,522	0,2670	0,0302	1,916	0,310	1,063
140	3,888	0,489	0,523	0,2646	0,0296	1,912	0,308	1,070
130	3,912	0,488	0,524	0,2629	0,0292	1,908	0,306	1,074
120	3,941	0,486	0,525	0,2608	0,0286	1,905	0,304	1,080
110	3,970	0,485	0,526	0,2589	0,0282	1,901	0,302	1,085
100	4,002	0,483	0,527	0,2565	0,0276	1,898	0,300	1,091
90	4,021	0,483	0,527	0,2553	0,0274	1,898	0,298	1,092
80	4,050	0,481	0,528	0,2533	0,0269	1,894	0,296	1,100

ЛИТЕРАТУРА

1. O. D. Slagle, H. A. McKinstry. J. Appl. Phys., 38, 446, 1967.
2. M. N. Norwood, C. V. Briscoe. Phys. Rev., 112, 45, 1958.
3. I. K. Galt. Phys. Rev., 73, 1460, 1941.
4. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. Изв. АН СССР. «Физика». 6, 22, 1970.
5. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 8, 2247, 1970.
6. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 5, 1563, 1970.
7. А. В. Шарко, А. А. Ботаки. ФТТ, 9, 2701, 1970.
8. М. С. Иванкина. Диссертация, Томск, 1959.